

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Montenegro, Héctor; Stelzer, Oliver**

## **Untersuchung des Einflusses von Gaseinschlüssen unterhalb des Grundwasserspiegels auf Druckausbreitung und Bodenverformungen mittels gekoppelter FE-Berechnungen**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102374>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Montenegro, Héctor; Stelzer, Oliver (2014): Untersuchung des Einflusses von Gaseinschlüssen unterhalb des Grundwasserspiegels auf Druckausbreitung und Bodenverformungen mittels gekoppelter FE-Berechnungen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktuelle Themen der Geotechnik. Karlsruhe: Herle, Ivo. S. 73-92.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# **Untersuchung des Einflusses von Gaseinschlüssen unterhalb des Grundwasserspiegels auf Druckausbreitung und Bodenverformungen mittels gekoppelter FE-Berechnungen**

**Hector Montenegro und Oliver Stelzer**

*Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe*

---

*Als Folge fluktuierender (Grund-)Wasserstände und/oder infolge des Abbaus organischer Substanzen kann es zum Einschluss feiner Gasbläschen im Porenraum kommen. Aufgrund der erheblich größeren Kompressibilität von Gas im Vergleich zu Wasser verfügt ein Boden mit Gaseinschlüssen über ein deutlich größeres Wasserspeichervolumen als ein vollständig wassergesättigter Boden. Dies kann sich auf die Ausbreitungsdynamik von durch mechanische oder hydraulische Laständerungen induzierten Porenwasserdrücken auswirken. Das Speichervolumen ist naturgemäß abhängig vom Porenwasserdruck, was insbesondere bei der Analyse von vertikal-ebenen oder 3D-dimensionalen Fragestellungen von Bedeutung ist. Ausgehend von bodenmechanischen Grundprinzipien werden die Auswirkungen von Lufteinschlüssen auf die Dynamik von Auflast, Verformung und Porenwasserdruck dargestellt. Ein physikalisch basierter Ansatz zur Berücksichtigung von Gaseinschlüssen unterhalb des Grundwasserspiegels wird vorgestellt und in ein gekoppeltes FE-Model implementiert. Anhand eines synthetischen Beispiels einer Baugrubenentwässerung werden die maßgebenden Parameter identifiziert und deren Einfluss auf die Entwicklung des Porenwasserüberdrucks am Spundwandfuß als dimensionslose Diagramme dargestellt. Anhand der Porenwasserdruckentwicklung in einem Erdamm während eines Wasserspiegelabsinks wird die Relevanz von Gaseinschlüssen in der geotechnischen Ingenieurpraxis illustriert.*

## **1 Einleitung**

Ausgehend von den beobachteten Porenwasserdruckreaktionen auf Grundwasserentnahmen und/oder Auflaständerungen wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts in den Disziplinen Grundwasserhydraulik und Bodenmechanik weitgehend unabhängig

voneinander erkannt, dass die Fähigkeit Wasser zu speichern oder abzugeben ein wesentliches Merkmal transienter Strömungs- und Verformungsprozesse ist [Nar06]. Angesichts der äußerst geringen Kompressibilität von Wasser und Feststoff wurde als Ursache für die Wasserspeicherung im Wesentlichen die Verformbarkeit des Korngerüsts ausgemacht. Bei der Auswertung zeigte sich jedoch häufig, dass die zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs von im Labor oder Feldexperiment beobachteten Porenwasserdrücken und/oder Setzungen erforderlichen Speicherparameter erheblich größer waren, als die aus den jeweiligen Verformungsmoduln errechneten Werte. Beispielsweise ergeben Pumpversuche zur Bestimmung des spezifischen Speicherkoeffizienten<sup>1</sup>  $S_s$  [1/L] in gespannten Grundwasserleitern häufig Werte im Bereich von ca.  $S_s = 1 \cdot 10^{-4}$  1/m. Diese Werte liegen um Größenordnungen über den Werten, die sich aus den Steifemoduln berechnen lassen. In den 1930-er Jahren versuchten Theis und Jacob diesen Widerspruch mit dem Vorhandensein von „weichen“ Tonschichten zu erklären [Nar06]. Auch Biot musste bei der Herleitung der Konsolidationstheorie neben Feststoff und Wasser eine weitere Phase postulieren, um die schon damals häufig beobachtete verzögerte und gedämpfte Ausbreitung von Porenwasserdruckänderungen zu beschreiben. Hierfür machte er das Vorhandensein immobilisierter Gasbläschen im Porenraum verantwortlich [Bio56]. Tatsächlich konnte man experimentell bestimmte Speicherkoeffizienten  $S_s$  mit Gaseinschlüssen und der großen Kompressibilität von Gas erklären. Gaseinschlüsse aufgrund natürlich fluktuierender Grund- oder Flusswasserstände oder infolge des Abbaus organischer Substanzen im Untergrund dürften weit häufiger vorkommen als gemeinhin vermutet, so dass sich die Frage stellt, wieso die Auswirkungen, etwa in Form von zeitlich veränderlichen Druckungleichgewichten, so selten dokumentiert sind. Im Folgenden werden die Wechselwirkungen zwischen Laständerung, Verformung und Strömung unter Berücksichtigung von Gaseinschlüssen dargelegt. Es wird ein Ansatz zur Berücksichtigung von Gaseinschlüssen unterhalb des Grundwasserspiegels vorgestellt und in ein FE-Modell zur gekoppelten Berechnung von Strömung und Verformung implementiert. Basierend auf einem Beispiel aus der geotechnischen Ingenieurpraxis werden die Bedingungen identifiziert, unter denen Gaseinschlüsse dynamische Druckungleichgewichte verursachen können.

## 2 Strömungs- und Verformungsberechnung

Ausgehend von Impuls- und Massenerhaltung lässt sich ein Gleichungssystem für die gekoppelte Strömungs-Verformungs-Berechnung herleiten [Ver13]:

$$S \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + n \frac{dS}{dp_w} \frac{dp_w}{dt} + n \frac{S}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial t} + (1 - n) \frac{S}{K_s} \frac{\partial p_w}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q}_w, \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> In der bodenmechanischen Literatur [Küm91] wird der Speicherterm  $S_s$  über die Summe der Kompressibilitäten von Korngerüst  $C$  [L<sup>2</sup>/F] und Fluid  $C_f$  [L<sup>2</sup>/F] definiert:  $S_s = \gamma_w \cdot (C + n \cdot C_f)$  [1/L].

$$\begin{aligned} \left(K + \frac{1}{3}G\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + G \nabla^2 u_x + \frac{\partial p_w}{\partial x} + f_x &= 0, \\ \left(K + \frac{1}{3}G\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + G \nabla^2 u_y + \frac{\partial p_w}{\partial y} + f_y &= 0, \\ \left(K + \frac{1}{3}G\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + G \nabla^2 u_z + \frac{\partial p_w}{\partial z} + f_z &= 0, \\ \varepsilon &= \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \end{aligned}$$

mit:

$\mathbf{q}_w$ :	Vektor der Darcy-Flüsse	[L/T]
$\varepsilon$ :	volumetrische Dehnung	[-]
$S$ :	Sättigungsgrad	[-]
$p_w$ :	Porenwasserdruck	[F/L <sup>2</sup> ]
$u_i$ :	Verformungen	[L]
$f_i$ :	Kräfte	[L]
$n$ :	Porosität	[-]
$K$ :	Kompressionsmodul des Bodens	[F/L <sup>2</sup> ]
$G$ :	Schubmodul des Bodens	[F/L <sup>2</sup> ]
$K_w$ :	Kompressionsmodul des Wassers	[F/L <sup>2</sup> ]
$K_s$ :	Kompressionsmodul des Korns	[F/L <sup>2</sup> ]

Nach Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen sowie von Materialparametern (z. B. Porenwasserdruck – Sättigungsbeziehung, ungesättigte Durchlässigkeit usw.) kann obige Differentialgleichung integriert werden und somit die Verteilung der Spannungen und der Porenwasserdrücke infolge Auflast- und/oder Druckänderungen im Modellgebiet (über und unter dem Grundwasserspiegel) beschrieben werden. Die Wasserspeichereigenschaften, häufig als *Speicherkapazität* bezeichnet, ergeben sich aufgrund der volumetrischen Verformungen  $\partial \varepsilon / \partial t$  des Korngerüsts sowie aufgrund der Sättigungsänderung  $dS/dp_w$ . Volumenänderungen des Porenwassers und der Feststoffe werden aufgrund der äußerst geringen Kompressibilitäten von Wasser  $K_w$  und Feststoff  $K_s$  gegenüber den Volumenänderungen des Korngerüsts sowie der Sättigung häufig vernachlässigt.

## 2.1 Auswirkungen der Wasserkapazität bei schnellen Belastungsänderungen

Bevor sich Porenwasserdruckänderungen im Boden fortpflanzen können, muss das vorhandene Speichervolumen aufgefüllt oder geleert werden. Die hierfür erforderliche Zeit wird von den Speicher- und Durchlässigkeitseigenschaften des Bodens bestimmt. Bei schneller Lastaufbringung entsteht somit ein zeitlich veränderliches Ungleichgewicht bis zur Einstellung eines neuen Gleichgewichts (stationärer Endzu-

stand) [Köh01]. In einem Gedankenexperiment werden im Folgenden die unterschiedlichen Reaktionen von Porenwasserdruck und effektiver Spannung auf mechanische (Auflasterhöhung) und hydraulische (Wasserstandserhöhung) Randbedingungsänderungen an Bodenkörpern unterschiedlicher Eigenschaften herausgearbeitet. Zur besseren Vergleichbarkeit sollen sich die mechanischen und die hydraulischen Einwirkungen betragsmäßig entsprechen.

### 2.1.1 Linear-elastischer, vollgesättigter Boden

Zunächst werden diese Vorgänge an einem elastischen, mit einem inkompressiblen Fluid vollgesättigten Bodenkörper (s. Feder als Symbol für die Elastizität des Bodens in Abbildung 1) erläutert. Die Einwirkungen am Bodenkörper sind links zum Zeitpunkt  $t = 0$  (d.h. vor Lastaufbringung) und rechts nach Einstellung des neuen Gleichwichts nach hinreichend langer Zeit  $t = \infty$  schematisch dargestellt. In den Diagrammen zwischen den Zeichnungen sind die Reaktionen auf die Randbedingungsänderungen als zeitlicher Verlauf des Porenwasserdrucks  $p_w$  sowie der effektiven Spannung  $\sigma'$  dargestellt.

In der oberen Reihe wird eine statische Auflast aufgebracht. Diese Randbedingungsänderung erfolgt so schnell, dass zunächst die gesamte Last vom Porenwasser aufgenommen wird. Erst allmählich kann Porenwasser aus dem Kontrollvolumen austreten, der Porenwasserüberdruck baut sich ab und die Last wird zunehmend auf das Korngestüt übertragen, was die effektive Spannung ansteigen lässt.

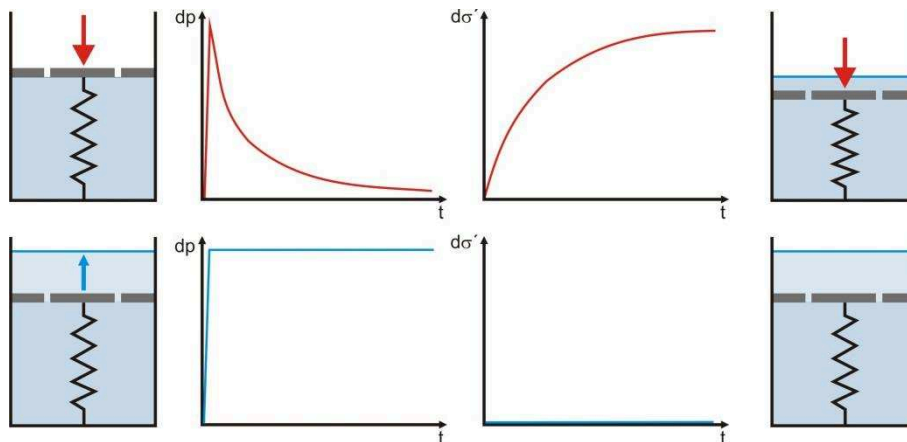


Abbildung 1: Änderungen des Porenwasserdrucks  $dp$  und der effektiven Spannung  $d\sigma'$  in einem gesättigten, linear elastischen Bodenkörper infolge mechanischer (oberes Bild) und hydraulischer (unteres Bild) Randbedingungsänderungen.

In der Skizze darunter werden die Verhältnisse dargestellt, wenn die Lastaufbringung in Form einer Wasserstandsänderung erfolgt. In diesem Fall erfahren die Korn-zu-Korn-Spannungen keine Änderung. Die Druckänderung pflanzt sich unmittelbar

fort, der Porenwasserdruck steigt simultan auf das durch die Wasserstandserhöhung vorgegebene Niveau an.

### 2.1.2 Starrer Boden mit Gaseinschlüssen

Nun werden die Reaktionen an einem Bodenkörper, der aufgrund von Gaseinschlüssen nicht vollständig wassergesättigt ist (s. Luftbläschen im Porenwasser in Abbildung 2), untersucht. Da die Gasbläschen von Porenwasser umschlossen sind, kann man von gleichen Druckbedingungen im Wasser und Gas ausgehen. Aufgrund der deutlich größeren Kompressibilität der Gasphase, soll der Bodenkörper als starr angesehen werden, was in Abbildung 2 durch die Stange statt der Feder symbolisiert wird. Unter diesen Umständen wird die Zusatzlast vollständig von den Korn-zu-Korn-Spannungen aufgenommen. Da infolge der sehr großen Bodensteifigkeit keinerlei Verformungen eintreten, werden keine Wasserflüsse induziert und die Druckverhältnisse bleiben vollständig unbeeinflusst.

Im Falle der hydraulischen Laständerung, im unteren Teil von Abbildung 2, erfolgt eine gänzlich andere Reaktion. Sowohl Porenwasserdruck als auch effektive Spannungen reagieren auf die hydraulische Einwirkung, allerdings zeigt die effektive Spannung eine sofortige Reaktion, während der Druckanstieg gedämpft erfolgt. Der Einstau erhöht sukzessive den Porenwasserdruck, wodurch die Gasbläschen, zunächst nur im oberen Bereich, komprimiert werden. Bevor diese Druckänderung sich weiter nach unten ausbreiten kann, muss Wasser durch den oberen Rand nachfließen und das komprimierte Gasvolumen ausgleichen.

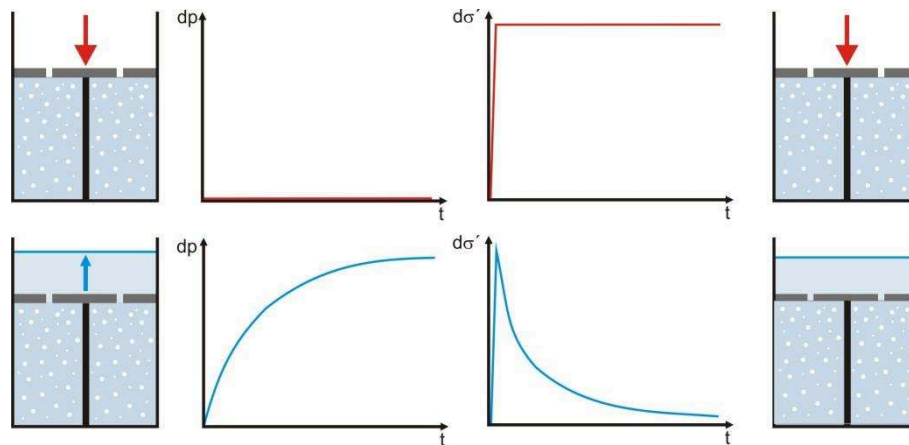


Abbildung 2: Änderungen des Porenwasserdrucks  $dp$  und der effektiven Spannung  $d\sigma'$  in einem starren Bodenkörper mit Gaseinschlüssen infolge mechanischer (oberes Bild) und hydraulischer (unteres Bild) Randbedingungsänderungen.

Je nach Speichereigenschaften (bzw. volumetrischem Anteil an Gasbläschen) und Durchlässigkeitseigenschaften kann das eine Weile dauern. Im oberen Bereich stellt sich somit das neue, höhere Potential ein, während darunter noch das niedrigere

Anfangspotential (bzw. Porenwasserdruckniveau) herrscht. Dieses Ungleichgewicht des Druckniveaus kann man als Potentialgradienten auffassen, der in Richtung des Potentialgefälles gerichtete Strömungskräfte induziert. Diese wiederum wirken als Volumenkräfte auf die Bodenkörner ein, wodurch die effektiven Spannungen bis zum Ende der Lastaufbringung ansteigen. Mit der Zeit kann Wasser immer weiter in den Boden nachströmen. Hierbei breitet sich das Porenwasserdruckungleichgewicht weiter nach unten aus und wird dabei gedämpft. Eine Abnahme der hydraulischen Gradienten vermindert die Strömungskräfte und damit auch die effektiven Spannungen.

Obwohl die Speicherkapazität im ersten Beispiel ausschließlich auf die elastische Bodenverformung und im zweiten ausschließlich auf der Volumenveränderung der Gaseinschlüsse beruht, weisen die oben schematisch dargestellten Reaktionen von Porenwasserdruck und effektiver Spannung Gemeinsamkeiten auf. So entspricht die Reaktion der effektiven Spannungen auf die mechanische Einwirkung im elastischen Boden der Porenwasserdruckreaktion infolge hydraulischer Einwirkung im Boden mit Gaseinschlüssen.

## 2.2 Kompressibilität infolge von Gaseinschlüssen

Zur Berücksichtigung der Speicherkapazität infolge von Gaseinschlüssen in Gleichung (1) bieten sich grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten an. Verbreitet ist ein Ansatz, bei dem die speichernutzbare Wirkung von Gaseinschlüssen durch Vorgabe einer Fluidkompressibilität  $C_{wg}$  [ $L^2/F$ ] der Wasser-Gas-Mischung berücksichtigt wird:

$$C_{wg} = \frac{1}{K_{wg}} = \frac{S}{K_w} + \frac{(1-S)}{K_g} = \frac{S}{K_w} + \frac{(1-S)}{(p_a + p_w)} \quad (2)$$

Hierbei wird  $C_{wg}$  aus der volumetrischen gewichteten Summe der Kompressionssteifigkeiten von Wasser  $K_w$  [ $F/L^2$ ] und Gas  $K_g$  [ $F/L^2$ ] ermittelt. Bei Gasen folgt die Kompressibilität in erster Näherung dem Boyle-Mariotte-Gesetz und entspricht somit dem jeweils vorherrschenden absoluten Druck (Summe aus atmosphärischem Druck  $p_a$  und Porenwasserdruck  $p_w$ ). Bei diesem Ansatz nimmt man den Porenraum unterhalb der Grundwasseroberfläche als mit einem Wasser-Gas-Gemisch vollgesättigt an, wodurch in Gl. 1 der Speicherterm  $dS/dp_w$  entfällt und der Term  $K_w$  durch den betragsmäßig wesentlich größeren Term  $K_{wg}$  ersetzt wird.

Im Kontext 2D vertikal-ebener oder 3D aufgelöster Modelle wirft ein derartiger Ansatz jedoch Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Mischungssteifigkeit  $K_{wg}$  auf, da der Porenwasserdruck fast immer mit der Tiefe zunimmt und damit auch die Gaskompressibilität  $K_g$  und letztlich  $K_{wg}$ . Formal liefert dieser Ansatz nämlich einen Speicherterm, der eine lineare Änderung des Speichervolumens infolge Druckänderung (mit der Steigung  $1/K_{wg}$ ) beschreibt. Dem gerade bei Gasen bedeutsamem Aspekt einer nicht-linearen Volumen-Druck-Beziehung kann dieser Ansatz nicht genügen. Man kann ein lineares Verhalten innerhalb bestimmter Druckbereiche

annehmen und den Parameter  $K_{wg}$  an die Druckverhältnisse entsprechend anpassen. Wenn die Fragestellung jedoch die Druckentwicklung in Bereichen unterschiedlicher Druckniveaus (z. B. vertikale Druckverteilung auf eine Spundwand) erfordert, müsste man im Modell eine Zonierung vorsehen und jedem Bereich gemäß dem dort herrschenden Druckniveau ein Parameterwert für  $1/K_{wg}$  zuweisen. Alternativ dazu könnte man auf Grundlage einer über den interessierenden Druckbereich gemittelten Sättigung  $S$  einen „mittleren“  $1/K_{wg}$  bestimmen. Bei zeitlich veränderlichen Randbedingungen kommt noch die Frage nach der geeigneten zeitlichen Mittelung des Speicherterms  $C_{wg}$ .

Diese Schwierigkeiten lassen sich durch einen Ansatz umgehen, bei dem die räumliche Verteilung des unterhalb der Grundwasseroberfläche eingeschlossenen Gasvolumens – und seiner Abhängigkeit vom äußeren Druck – explizit Berücksichtigung findet [Mon04]. Ausgangspunkt für diesen Ansatz ist die Beobachtung, dass der Porenraum aufgrund eingeschlossener Gasbläschen ohne einen gewissen Überdruck (d. h.  $p_w > 0$ ) nicht vollständig gesättigt werden kann. Erst durch Zunahme des Porenwasserdrucks  $p_w$  erfolgt eine Volumenverringern der Gasphase  $V_g$  [L<sup>3</sup>] und somit eine Erhöhung des Sättigungsgrades  $S$  [-] bis zum Erreichen der Vollsättigung (d. h.  $S = 1$ ). Basierend auf die Gesetze von Boyle-Mariotte zum Zusammenhang von Volumen und Druck in Gasen und Henry zur Löslichkeit von Gasen in Wasser entwickelte Hilf bereits in den 1940-er Jahren einen Ansatz zur Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Druckänderung  $\Delta p_g$  [F/L<sup>2</sup>] und Volumenänderung  $\Delta V_g$  [L<sup>3</sup>] einer im Porenraum eingeschlossenen Gasphase [Fre12]. Dieser Ansatz erfordert weitere Parameter, wie die Anfangsporosität  $n_0$  [-], die Anfangswassersättigung  $S_0$  [-], den Atmosphärendruck  $p_a$  [F/L<sup>2</sup>] sowie den Löslichkeitskoeffizienten  $h^*$  [-]:

$$\Delta S = \frac{\Delta V_g}{V_0 n_0} = \frac{(1 - S_0 + h^* \cdot S_0)}{(p_a + \Delta p_g)} \Delta p_g \quad (3)$$

Es wird ferner unterstellt, dass die vergleichsweise geringen Volumenänderungen  $\Delta V_g$  den strömungswirksamen Querschnitt kaum beeinflussen und daher sich nicht auf die hydraulische Durchlässigkeit auswirken. Auch bei diesem Ansatz wird ein Druckgleichgewicht zwischen eingeschlossener Gas- und umgebender Wasserphase (d. h.  $p_g = p_w$ ) unterhalb des Grundwasserspiegels angenommen. Abbildung 3 zeigt gemäß Gleichung (3) den Sättigungsverlauf  $S$  in Abhängigkeit vom Porenwasserdruck  $p_w$  für unterschiedliche Anfangssättigungen  $S_0$ . Das Volumen der Gasphase wird gemäß dem Boyle-Mariotte-Gesetz mit zunehmendem Porenwasserdruck komprimiert, und der Sättigungsgrad  $S$  nimmt entsprechend zu. Ab einem gewissen Druckniveau löst sich das Gas im Porenwasser vollständig auf und es stellt sich Vollsättigung  $S = 1$  ein.

Zum Vergleich ist in Abbildung 3 rechts die basierend auf obige Sättigungsbeziehung berechnete Steifigkeit  $K_{wg}$  als Funktion des Porenwasserdrucks  $p_w$  dargestellt. Da der Sättigungsgrad  $S$  vom Porenwasserdruck  $p_w$  abhängt, nimmt auch  $K_{wg}$  nicht-linear (man beachte die logarithmische Darstellung) mit  $p_w$  zu. Der auf dem Wasser-Gas-Gemisch basierende Ansatz setzt eine Konstante  $K_{wg}$  voraus, was in Abbildung



3 als senkrechte Linie dargestellt werden müsste. Bei Vollsättigung erfolgt im  $K_{wg}$ -Diagramm ein Sprung auf den um Größenordnungen geringeren Wert der Wassersteifigkeit  $K_w$ . Dieser Sprung veranschaulicht, dass bereits geringste Volumenanteile eingeschlossenes Gas die Steifigkeit des Porenfluids - und letztlich die Speicherkapazität - erheblich erhöhen. An diesem Diagramm kann man auch erkennen, dass der Fehler bei der Einschätzung der Speichereigenschaften bei Vernachlässigung von Gaseinschlüssen deutlich größer ausfällt, als der Fehler, den man begeht, wenn man die Anfangssättigung  $S_0$  falsch einschätzt oder die Druckabhängigkeit des Speicherterms außer Acht lässt.

Algebraische Umformungen von Gleichung (3) offenbaren die formale Ähnlichkeit der Speicherterme beim Fluidkompressibilitäts- und beim Sättigungs-Ansatz. Hierbei wird der Term  $dS/dp_w$ , in Anlehnung an die Terminologie der ungesättigten Bodenzone, als Speicherkapazität  $C$  [ $L^2/F$ ] bezeichnet. Formal entspricht dieser Ansatz einer Erweiterung der Saugspannungs-Sättigungsbeziehung von der teilgesättigten Zone bis unterhalb des Grundwasserspiegels [Mon04].

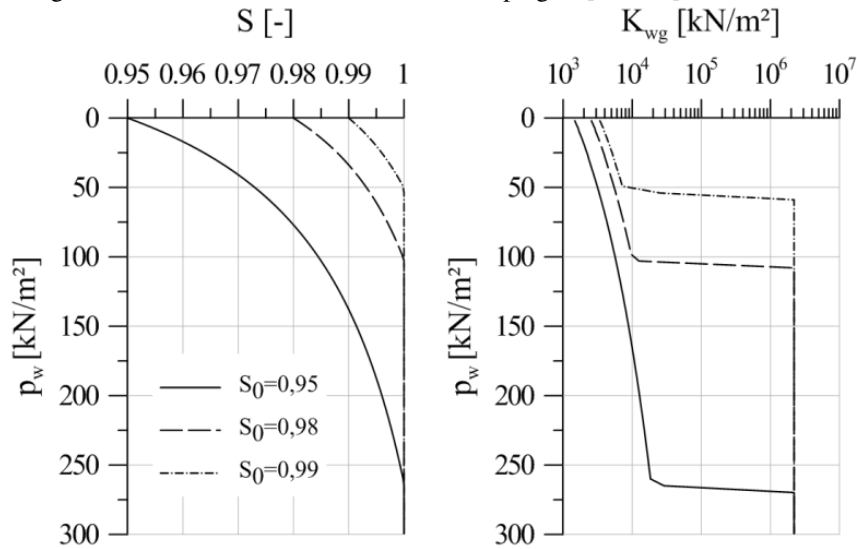


Abbildung 3: Einfluss des Porenwasserdrucks  $p_w$  auf die Sättigung  $S$  (links) und auf die Steifigkeit des Wasser-Gas-Gemisches  $K_{wg}$ .

Die Speicherkapazität ist unterhalb des Grundwasserspiegels vom Absolutdruck ( $p_a + dp_w$ ) abhängig. Oberhalb des Wasserspiegels, wo die Gasphase kontinuierlich ist und Atmosphärendruck aufweist, ist  $C$  von der Saugspannung  $\psi$  [ $F/L^2$ ] abhängig.

$$\frac{dS}{dp_w} = \frac{(1 - S_0 + h^* \cdot S_0) \cdot p_a}{(p_a + p_w)^2} = C \quad (4)$$

Der (verschwindend geringe) Term  $S/K_w$  aus Gleichung (2) findet im 4. Term von Gleichung (1) Berücksichtigung, so dass der betragsmäßige Unterschied lediglich in der Berücksichtigung der Gaslöslichkeit durch den Koeffizienten  $h^*$  liegt. Der wesentliche Vorteil des hier vorgestellten Sättigungsansatzes liegt darin, dass eine Vorabschätzung "mittlerer" Druckverhältnisse zur Auswertung von  $K_{wg}$  entfällt. Der Speicherterm  $C$  wird im Verlauf der Berechnung an jedem Ort und zu jeder Zeit stets gemäß Gleichung (4) als Funktion vom aktuellen Porenwasserdruck  $p_w$  ausgewertet.

### 2.3 Speicherkapazität aus elastischer Verformung und Gaskompression

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie sich die Speicherkapazität in verformbaren Böden mit Gaseinschlüssen darstellt. Im Falle einer schlagartigen Laständerung, die so schnell erfolgt, dass keine Wasserzu- oder abflüsse erfolgen (undrained Belastung), kann man auf die Überlegungen von Skempton zur Lastaufteilung zwischen Bodenmatrix und Wasser (bzw. Gas, das unter dem selben Druck  $p_w$  steht) zurückgreifen [Ste14]. Man erhält einen Zusammenhang zwischen Porenwasserdruckzunahme  $dp_w$  und Auflaständerung  $d\sigma$  (hier dargestellt für oedometrische Belastung):

$$dp_w = \frac{1}{1 + n C E_s} d\sigma = B^* d\sigma \quad (5)$$

In Anlehnung an Skempton wird der Parameter, der eine Auflaständerung auf Fluid und Korngerüst aufteilt, mit  $B^*$  bezeichnet<sup>2</sup>.  $B^*$  variiert je nach Bodensteifigkeit  $E_s$  [ $F/L^2$ ] und Speicherkapazität  $C$  (diese ist wiederum abhängig vom Sättigungsgrad  $S$  bzw. vom Porenwasserdruck  $p_w$ ) zwischen 0 und 1. Algebraische Umformungen zeigen, dass  $B^*$  ein Maß für das Verhältnis der Bodenkompressibilität  $1/E_s$  zur Summe der Kompressibilitäten von Korngerüst und Gasphase ist.

$$B^* = \frac{1}{1 + n C E_s} = \frac{\frac{1}{E_s}}{\left(\frac{1}{E_s} + n C\right)} \quad (6)$$

Analog lässt sich die Reaktion des Porenwasserdrucks auf eine hydraulische Laständerung  $dh \cdot \gamma_w$  herleiten. Da diese Einwirkung als Wasserstandserhöhung oder als Wasserstandsabsenkung auftreten kann, ist es sinnvoll, die Reaktion auf den stationären Gleichgewichtszustand zu beziehen. Hierbei stellt  $p_0$  den Porenwasserdruck vor der Einwirkung und  $p_s$  den stationären Endzustand dar [Ste14].

$$dp_w = p_w - p_s = (p_0 + B^* dh \gamma_w) - (p_0 + dh \gamma_w) = (B^* - 1) dh \gamma_w \quad (7)$$

---

<sup>2</sup> Der Elastizitätsparameter ist realistisch betrachtet keine Konstante. Ähnlich wie  $C$  von  $(p_a + p_w)$  ist  $E_s$  u.a. von  $\sigma$  abhängig.

Interessanterweise entspricht die Druckänderung  $dp_w$  infolge hydraulischer Belastung dh  $\gamma_w$  gerade dem Komplement  $(1-B^*)$  einer gleich großen statischen Belastung  $d\sigma$ . Es ergibt sich entweder einen Porenwasserüberdruck (bei Absink) oder ein Porenwasserdruckdefizit (bei Aufstau), jeweils bezogen auf den stationären Endzustand [Ste14].

Nun lässt sich das in 2.1 vorgestellte Gedankenexperiment auf den Fall eines linear-elastischen Bodens, in dessen Porenraum Gasbläschen eingeschlossen sind, übertragen. Unter diesen Bedingungen reagieren sowohl der Porenwasserdruck  $p_w$  als auch die effektive Spannung  $\sigma'$  unmittelbar auf die Laständerung. Die Aufteilung der Laständerung auf Porenwasser und Korngerüst erfolgt - bei schlagartiger Belastung - gemäß dem Parameter  $B^*$ .

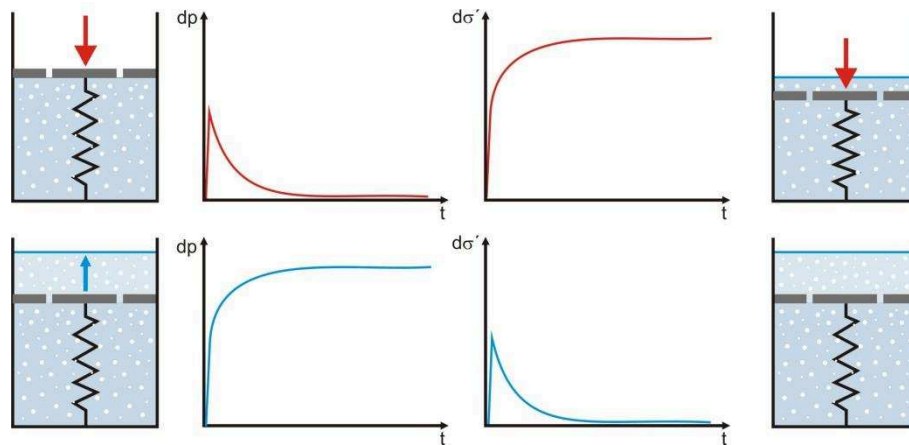


Abbildung 4: Änderungen des Porenwasserdrucks  $dp$  und der effektiven Spannung  $d\sigma'$  in einem linear-elastischen Bodenkörper mit Gaseinschlüssen infolge mechanischer (oberes Bild) und hydraulischer (unteres Bild) Randbedingungsänderungen.

### 3 Identifikation der maßgebenden Parameter

Der Skempton-Ansatz zur Aufteilung einer plötzlichen Laständerung auf Wasser und Korngerüst setzt undrainede Verhältnisse voraus, d. h. aufgrund der augenblicklichen Belastung kann Wasser weder zu- oder abfließen. Zur Untersuchung, wie sich eine aufgebrachte Zusatzlast auf Korngerüst und Porenwasser aufteilt, wenn *keine* undrainede Verhältnisse vorliegen, ist ein gekoppeltes Strömungs-Verformungsmodell erforderlich. Dimensionsanalytische Überlegungen helfen hierbei Anzahl und Komplexität der (numerisch-experimentellen) Variablen in einem gegebenen Problem zu reduzieren.

Die Reaktion von Bodenspannungen und Porenwasserdrücke auf eine Laständerung hängt von der Belastungsgeschwindigkeit  $v = d\sigma/dt$  bzw.  $v = dh/dt$ , den Durchlässigkeitseigenschaften des Bodens  $k$  sowie von dem aufzufüllenden oder zu leeren Speichervolumen ab. Das Speichervolumen wiederum setzt sich aus den Verformungen von Korngerüst und Gasphase zusammen. Der dimensionslose Parameter  $v/k$  kennzeichnet die Lastaufbringungsgeschwindigkeit in Bezug auf die Durchlässigkeitseigenschaften. Obwohl in einem anderen Kontext hergeleitet, ist der Skempton-Parameter gemäß Gleichung (6) zur Charakterisierung des Steifigkeitsverhältnisses zwischen Korngerüst und eingeschlossener Gasphase gut geeignet.

Der relative Einfluss der als maßgebend erkannten dimensionslosen Parameter  $v/k$  und  $B^*$ , wird anhand von Berechnungsvarianten basierend auf einem gekoppelten Strömungs- und Verformungsmodell herausgearbeitet. Hierbei soll die Porenwasserdruckentwicklung am Spundwandfuß (s. Pfeil in Abbildung 5) einer zu lenzenden Baugrube betrachtet werden.

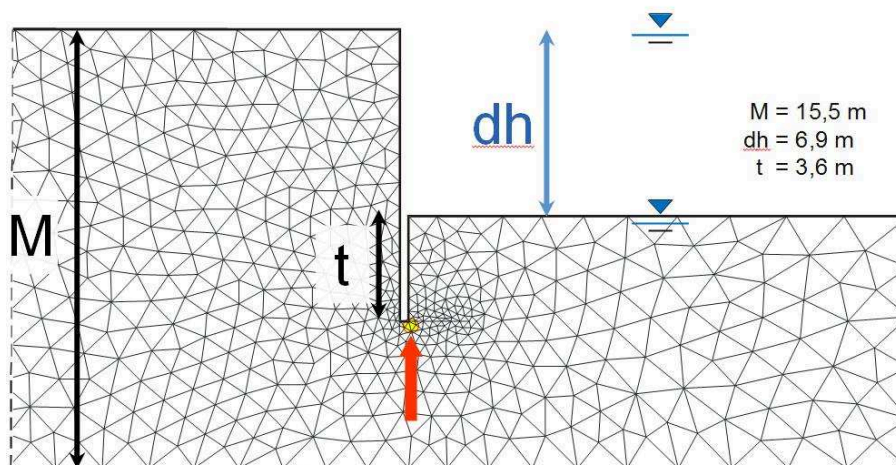


Abbildung 5: FE-Netz und Systemskizze einer zu lenzenden Baugrube zur Bestimmung der Porendruckentwicklung am Spundwandfuß (roter Pfeil).

### 3.1 Laständerungsgeschwindigkeit und Durchlässigkeit

Zunächst wird der Boden als starr angenommen ( $E_s \rightarrow \infty$ ,  $B^* = 0$ ), die Speicherkapazität ergibt sich einzig aus der Kompressibilität der eingeschlossenen Gasphase. Bei sämtlichen Varianten wurde eine Anfangssättigung  $S_0 = 0,9$  mit Tiefenverteilung gemäß Gleichung (3) vorgegeben. Abbildung 6 stellt die Reaktion des Porenwasserdrucks am Spundwandfuß auf den Lenzvorgang in dimensionsloser Form dar. Hierbei wird der Porenwasserdruck auf den stationären Endzustand  $p_s$  bezogen und mit der Wasserstandsänderung ( $dh \cdot \gamma$ ) in der Grube normiert. Dies entspricht einer Darstellung des normierten Porenwasserüberdrucks am Spundwandfuß.

Der Lenzvorgang verläuft gleichmäßig mit der Geschwindigkeit  $v = dh/dt$  und dauert bis zum Zeitpunkt  $t_0$  an, dem Zeitpunkt, an dem sich der größte hydraulische Gradient zwischen Spundwandfuß und Baugrubensohle aufbaut. Abbildung 6 zeigt, dass sowohl der maximale Porenwasserüberdruck zum Zeitpunkt  $t = t_0$  (Ende des Lenzvorgangs) als auch der Dissipationsverlauf ( $t > t_0$ ) vom Verhältnis  $v/k$  abhängen. Je rascher die Lastaufbringung erfolgt (großes  $v/k$ -Verhältnis), umso weniger Zeit hat das gespeicherte Porenwasser um auszuströmen und umso verzögerter erfolgen sowohl die Druckfortpflanzung von der Baugrubensohle zum Spundwandfuß als auch die anschließende Druckdissipation.

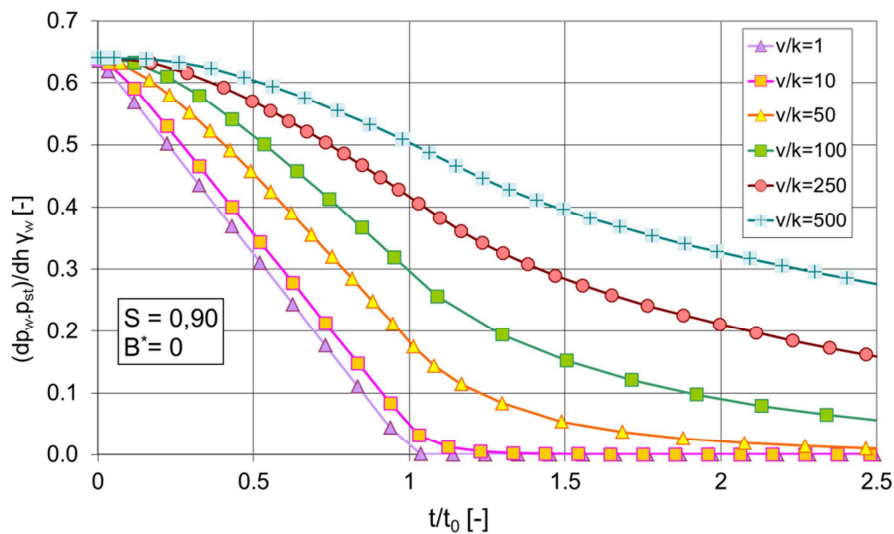


Abbildung 6: Verlauf des Porenwasserüberdrucks (dimensionslos) am Spundwandfuß infolge Lenzen der Baugrube für unterschiedliche  $v/k$  und konstantem  $B^* = 0$ .

In dieser Betrachtung sind Begriffe wie „schnell“ oder „langsam“ im Kontext der Durchlässigkeitseigenschaften zu sehen und umfassen auf der Zeitskala eine Bandbreite von Sekunden bis Monaten. Bei hohen  $v/k$ -Werten können die hydraulischen Gradienten erheblich sein. Im Beispiel herrscht am Ende der Absenkung ( $t=t_0$ ) bei  $v/k = 500$  (durchaus praxisrelevante Parameter wären z. B.  $k = 2 \cdot 10^{-7}$  m/s bei  $v = 0,36$  m/Std.) ein Porenwasserüberdruck (gegenüber dem stationären Endzustand  $p_{st}$ ) am Spundwandfuß von immerhin ca. 50 % des ursprünglich auf die Sohle wirkenden Wasserdrucks ( $0,5 \cdot d_h \cdot \gamma_w = 33,8$  kN/m<sup>2</sup>). Im Zuge eines Nachweises des Erdwiederlagers, des Auftriebs usw. würde man in diesem Fall bei Nicht-Beachtung von Gaseinschlüssen die Druckverhältnisse am Spundwandfuß deutlich unterschätzen. Diese Auswertung veranschaulicht auch, dass vorhandene Gaseinschlüsse nur für  $v/k < 1$  vernachlässigt werden dürfen. Möglicherweise erfolgt eine Vielzahl von Belastungen in der geotechnischen Ingenieurpraxis unter geringen  $v/k$ -Werten, Bedingungen, unter denen Porenwasserüberdrücke kaum auftreten.

### 3.2 Bodenverformung und Gaskompression

Nicht nur die die Elastizitätseigenschaften der Gaseinschlüsse sondern auch die des Korngerüsts haben Einfluss auf das Wasserspeichervolumen und somit auf die Dynamik der Porenwasserdruckentwicklung. Unter Berücksichtigung des elastischen Verhaltens des Bodens bewirkt der Lenzvorgang eine zusätzliche Volumenänderung, was wiederum noch mehr Speichervolumen aktiviert. Wie oben erwähnt, lässt sich das Steifigkeitsverhältnis zwischen Boden und Gasphase mittels des Parameters  $B^*$  charakterisieren. Der Parameter  $B^*$  hängt mittelbar über die Wasserkapazität  $C$  gemäß Gleichung (4) vom aktuellen Porenwasserdruck  $p_w$  ab. Für die Auswertung von  $B^*$  bietet es sich in diesem Beispiel an, den Mittelwert des Porenwasserdrucks am Spundwandfuß  $\bar{p}_w$  zwischen Anfangs- und Endzustand einsetzen.

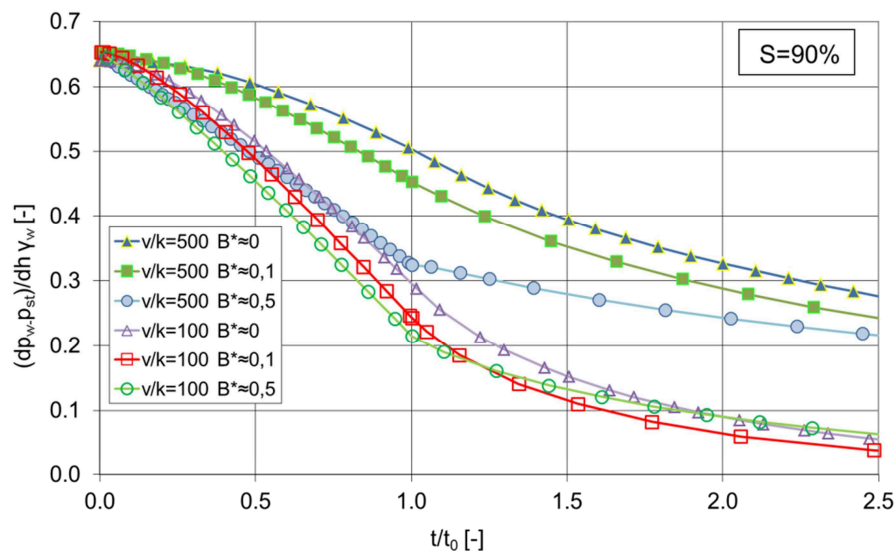


Abbildung 7 Verlauf des Porenwasserüberdrucks (dimensionslos) am Spundwandfuß infolge Lenzen der Baugrube für unterschiedliche  $v/k$  und  $B^*$ .

Gemäß Gleichung (6) kennzeichnet der Parameter  $B^*=0$  einen starren Boden ( $E_s \rightarrow \infty$ ),  $B^*=0,1$  drückt aus, dass die Kompressibilität des Korngerüsts 9 Mal geringer ist, als die der Gaseinschlüsse.  $B^*=0,5$  bedeutet, dass die Bodenkompressibilität gerade der Kompressibilität der eingeschlossenen Gasphase entspricht.

Abbildung 7 zeigt, dass mit zunehmender Bodensteifigkeit (kleinere  $B^*$ -Werte) die Porenwasserüberdrücke steigen. Ferner ist in Abbildung 7 zu sehen, dass der Dissipationsvorgang ( $t > t_0$ ) bei höheren  $B^*$ -Werten etwas verzögerter erfolgt als bei niedrigeren (steifere Böden). Ist der Boden sehr steif, können sich große hydraulische Gradienten aufbauen, so dass die Wasserstandsänderungen in der Baugrube

unterhalb der Baugrubensohle zunächst kaum zu spüren sind und daher dort hohe Porenwasserüberdrücke herrschen. Ist der Boden jedoch verformbar (größere  $B^*$ -Werte), können sich die hydraulischen Gradienten infolge des Lenzvorgangs offensichtlich nicht in dem Maße aufbauen. Die strömungsbedingte Volumenänderung des Korngerüsts bietet dem infolge Dekompression der Gasphase verdrängtem Wasser Raum, so dass sich der Druckabfall infolge Lenzvorgang deutlich schneller nach unten ausbreitet und sich infolgedessen in der Tiefe geringere Porenwasserüberdrücke einstellen. Interessanterweise spielt der Kompressibilitätskontrast zwischen Korngerüst und Gasphase, ausgedrückt über den Parameter  $B^*$ , mit zunehmenden  $v/k$  einer immer dominanteren Rolle.

Aus obiger Analyse kann man folgern, dass bei der Berechnung des Porenwasserüberdrucks die Annahme eines starren Bodens ( $B^* = 0$ ) auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefert. Das ist in so fern vorteilhaft, da diese Annahme keine gekoppelte Berechnung erfordert.

#### 4 Fallbeispiel Glen Shira Dam

Ungefähr 100 km nördlich von Glasgow, Schottland befindet sich das 1957 errichtete Glen Shira Pumpspeicher-Wasserkraftwerk. Unterhalb der Talsperre wird ein kleinerer Wasserspeicher durch einen ca. 17 m hohen Erddamm eingestaut. In dem aus Moränenmaterial gebauten Damm, der wasserseitig mit einer Steinschüttung versehen ist, fungiert eine Betonwand als Kerndichtung. Aufgrund des vergleichsweise kleinen Speichervolumens ist während des Pumpbetriebs mit relativ großen Wasserstandsschwankungen zu rechnen. Beim Bau wurden daher im Erddamm Porenwasserdruckaufnehmer installiert, um die Reaktion des Porenwasserdrucks auf Speicherspiegeländerungen aufzuzeichnen [Pat61]. Der Aufbau des Erddamms sowie die Lage der 5 Piezometer sind in Abbildung 8 dargestellt.

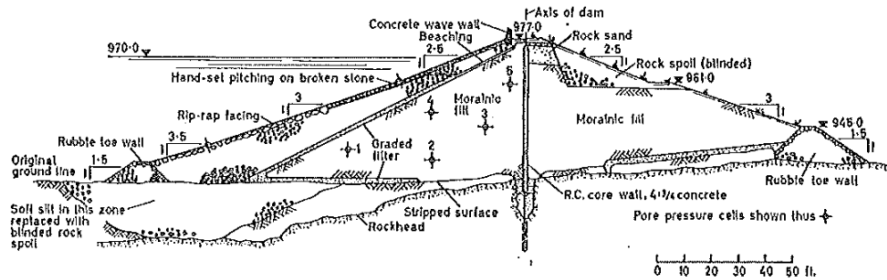


Abbildung 8: Schnitt durch den Glen Shira Damm [Pat62].

Im Anschluss an einer mehrwöchigen Einstauphase wurde der Wasserspiegel um ca. 9 m während eines Zeitraums von ca. 4 Tagen abgesenkt. Das Verhältnis Absinkgeschwindigkeit zu Durchlässigkeit  $v/k > 1000$  ist sehr groß, so dass man davon aus-

gehen kann, dass für den Fall, dass sich im Dammkörper Gaseinschlüsse befinden, die oben beschriebenen Effekte auftreten müssten.

Das Absunkszenario wurde mit einem 2D-gekoppelten FE-Modell (Plaxis) nachgerechnet, zunächst unter der Annahme, dass keine Gasbläschen eingeschlossen sind (Variante A). Hierbei wurden Erddammmaterial, Steinschüttung, Dränageschicht sowie Untergrund als isotrop und linear-elastisch angenommen. Das unterlagernde Festgestein ist mit  $10^{-10}$  m/s deutlich undurchlässiger als Dammkern und Steinschüttung. Zur Berücksichtigung der teilgesättigten Fließprozesse oberhalb des Grundwasserspiegels/Sickerlinie wurden ferner eine geeignete Saugspannungs-Sättigungsbeziehung sowie eine Durchlässigkeits-Sättigungsbeziehung zugewiesen, was jedoch für die weitere Betrachtungen nicht von Relevanz ist.

Da der Auffüllungsverlauf nicht hinreichend dokumentiert ist, wurde bei der Modellierung von einem hydrostatischen Anfangszustand ausgegangen. Bei einer nachfolgenden Berechnung (Variante B) wurde eine Anfangssättigung von  $S = 0,98$  angenommen, was einem volumetrischen Anteil von lediglich 2 % entspricht.

Unter der Annahme hydrostatischer Verhältnisse vor dem Absunk ergibt sich eine Sättigungsverteilung in der Tiefe gemäß Abbildung 3. Die Materialeigenschaften für beide Varianten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. In Abbildung 9 sind für Variante A (keine Gaseinschlüsse) die gemessenen (Symbole) den berechneten (Linien) hydraulischen Potentiale gegenüber gestellt.

Tabelle 1: Modelparameter

Parameter	Einheit	Moränen	Felsbruch
Durchlässigkeit $k_{\text{sat}}$	[m/s]	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Porosität $n_0$	[-]	0,25	0,4
Elastizitätsmodul E	MN/m <sup>2</sup>	100	100
Poissonzahl $\nu$	[-]	0,3	0,3

Die Ergebnisse für Variante B, der Berechnung unter Berücksichtigung von Gaseinschlüssen, sind in einem entsprechenden Diagramm in Abbildung 10 gezeichnet. Beim Vergleich beider Diagramme fällt der gedämpfte und zeitlich verzögerte Verlauf der Potentialganglinien aus der Variante B (mit Gaseinschlüssen) im Vergleich zu Variante A (ohne Berücksichtigung von Gaseinschlüssen) auf. Erst diese verzögerte Ausbreitung führt zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messungen, auch wenn die Anpassungsgüte in den einzelnen Messstellen unterschiedlich ausfällt. Die Messwerte der Druckaufnehmer nahe der Böschung P1 und P2 werden im Modell mit Berücksichtigung der Gaseinschlüsse (Abbildung 10) sehr gut erfasst, der Verlauf der Ganglinien der weiter innen liegenden Druckaufnehmer P2 und P3 wird lediglich qualitativ gut reproduziert, während der Verlauf im obersten Druckaufnehmer P5 am schlechtesten abgebildet wird. In beiden Berechnungsvarianten reagiert die oberste Messstelle kaum auf die Absenkung. Die Vorgabe einer lokal höheren Durchlässigkeit oder die Berücksichtigung anisotroper Durchlässigkeitseigenschaften des Moränenmaterials würde eine bessere Übereinstimmung



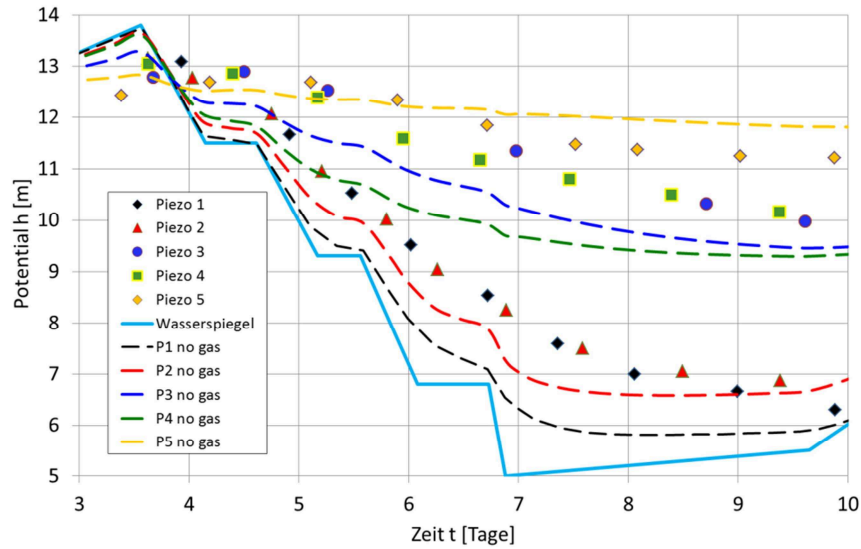


Abbildung 9: Gemessene (Symbole) und ohne Berücksichtigung von Gaseinschlüssen berechnete (gestrichelte Linien) Potentiale während des Absunks (Speicherwasserspiegel durchgezogene Linie).

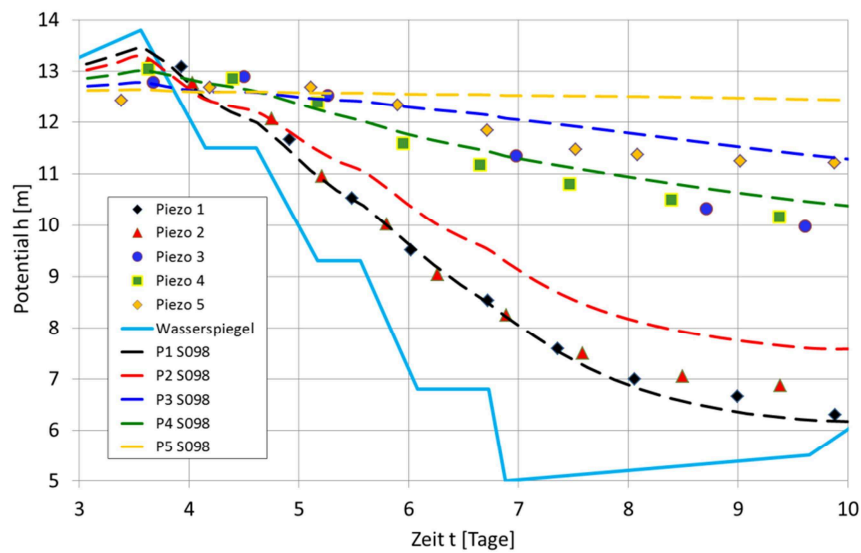
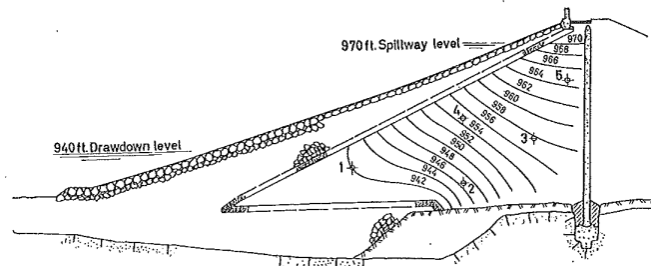


Abbildung 10: Gemessene (Symbole) und mit Berücksichtigung von Gaseinschlüssen berechnete (gestrichelte Linien) Potentiale während des Absunks (Speicherwasserspiegel durchgezogene Linie).

mit den inneren Messstellen liefern. Intention dieser Untersuchung ist jedoch, dass allein die Berücksichtigung eines sehr geringen Volumens an Gaseinschlüssen die Ergebnisse der Nachrechnung der Feldbeobachtungen entscheidend verbessert.

Die Autoren der Untersuchungen am Glen Shira Damm werteten die theoretisch zu erwartende Potentialverteilung am Ende der Absenkung zeichnerisch aus (s. Abbildung 11) und stellten diese einer Verteilung auf Grundlage der interpolierten Messdaten (s. Abbildung 12) gegenüber. Die gemessene Potentialverteilung zeigt, dass am Ende des Absinks im Damminnern deutlich höhere Potentiale vorherrschen, als theoretisch zu erwarten war. An der Böschung und an der Aufstandsfläche herrscht das Potential des Speicherwasserspiegels, das sich aufgrund des durchlässigen Filter- und Felsbruchmaterials nahezu unverzüglich fortpflanzen kann. Aus diesem Grund weist die beobachtete Potentialverteilung in Abbildung 12 deutliche, von innen nach außen weisende hydraulische Gradienten entlang der Böschung sowie an der Basis aus.



während des Absunks tritt hier aufgrund der hohen Bodensteifigkeiten nicht auf. Zu genau dieser Schlussfolgerung kamen die Autoren der Shira Dam Untersuchungen. Sie identifizierten Gaseinschlüsse als den einzig plausiblen Grund für die Beobachtungen: „*The amount of air present in the pores of a bank fill affects the pore pressure/strain relationship. This factor is not readily assessed by laboratory tests or theory*“ [Pat62]. Die auf Grundlage eines gekoppelten Modells berechneten Potentialverteilungen in Abbildung 13 und Abbildung 14 (Isolinien zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls in [ft] dargestellt) liefern nach über 50 Jahren eine Bestätigung ihrer Interpretation.

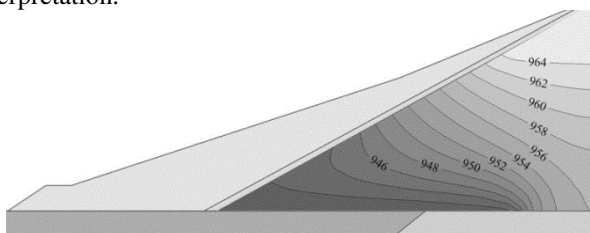


Abbildung 13: Numerisch berechnete Potentialverteilung (Isolinien in ft) am Ende des Absunks ohne Berücksichtigung von Gaseinschlüssen (Variante A).

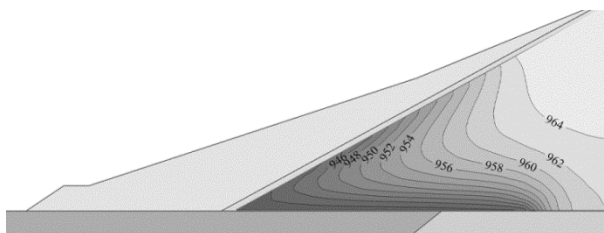


Abbildung 14: Numerisch berechnete Potentialverteilung (Isolinien in ft) am Ende des Absunks mit Berücksichtigung von Gaseinschlüssen (Variante B).

## 5 Zusammenfassung

Als Folge fluktuierender (Grund-)Wasserstände und/oder infolge des Abbaus organischer Substanzen kann es im Porenraum zu Gaseinschlüssen kommen. Hierdurch wird die Wasserspeicherkapazität infolge der erheblichen Kompressibilität von Gas im Vergleich zu Wasser vergrößert, was sich auf die Ausbreitungsdynamik von durch (mechanische oder hydraulische) Laständerungen induzierte Porenwasserdruckänderungen auswirken kann.

Es wird ein physikalisch basierter Ansatz zur Berücksichtigung von Gaseinschlüssen unterhalb des Grundwasserspiegels vorgestellt und in gekoppelten FE-Berechnungen verwendet. Der vorgestellte Ansatz einer druckabhängigen Speicher-

kapazität  $C(p_w)$  weist deutliche Vorteile gegenüber dem Ansatz eines vollgesättigten Bodens mit einem Fluid der Kompressibilität eines Wasser-Gas-Gemischs  $C_{wg}$ . Im Gegensatz zum  $C_{wg}$ -Ansatz wird beim  $C(p_w)$ -Ansatz der Speicherterm den sich in Raum und Zeit ändernden Druckverhältnissen innerhalb der Iterationsschleife ständig angepasst.

Die Berücksichtigung von Gaseinschlüssen erfordert grundsätzlich die Abschätzung des Volumens der eingeschlossenen Gasphase, wofür derzeit keine anerkannten Feldmethoden existieren. Allerdings zeigt sich, dass der Fehler durch Vernachlässigung vorhandener Gaseinschlüsse deutlich größer ausfällt, als der Fehler, den man durch Annahme einer „falschen“ Gassättigung macht.

Anhand eines in der geotechnischen Ingenieurpraxis typischen Fallbeispiels des Lenzens einer Baugrube wird die Bedeutung der für die Porenüberdruckentwicklung maßgebenden Kenngrößen herausgearbeitet. Die dimensionslosen Parameter sind:

- die Laständerungsgeschwindigkeit bezogen auf die Durchlässigkeit  $v/k$  sowie
- das Verhältnis der Steifigkeit von Korngerüst und Porenfluid, ausgedrückt durch den Parameter  $B^*$ .

Eine Grundwasserströmungsanalyse basierend auf herkömmlichen Speicherparametern würde bei hohen Laständerungsgeschwindigkeiten (d. h.  $v/k > 1$ ) die Porenwasserdruckreaktion auf äußere Wasserstandsänderungen unterschätzen. Schließlich illustriert die Auswertung der Porenwasserdruckentwicklung in einem Erddamm während eines Absunks des Speicherspiegels die Relevanz von Gaseinschlüssen in der geotechnischen Ingenieurpraxis.

## Literatur

- [Bio56] BIOT, M.A. *General solutions of the equations of elasticity and consolidation for porous materials*, *Journal of Applied Mechanics*: 23(2), 1956.
- [Fre12] FREDLUND, D.G., Rahardjo, H. and Fredlund, M. D. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc. 2012.
- [Köh01] KÖHLER, H.-J. *Dreiphasensystem Boden unter Wasser. Auswirkungen auf die Porenwasserspannungen. Schriftenreihe Geotechnik, 3. Workshop "Teilgesättigte Böden", Bauhaus-Universität Weimar, 2001, 12. Oktober 2001, T. Schanz & K.J. Witt (eds.), Weimar, Heft 06, pp. 59-90.*
- [Küm91] KÜMPEL, H.-J. *Poroelasticity: parameters reviewed*. *Gephys. J. Int.* 105, pp. 783-799. 1991.
- [Mon04] MONTENEGRO, H.; Köhler, H.-J. and Holfelder, T. *Inspection of excess pressure propagation in the zone of gas entrapment below the*

*capillary fringe. Proceedings, International Conference "From Experimental Evidence towards Numerical Modelling of Unsaturated Soils", Weimar, Germany, Vol. 2, September 2003.*

- [Nar06] NARASIMHAN, T. N. *On Storage Coefficient and Vertical Strain. Ground Water. Vol. 44, No.3, 2006.*
- [Pat61] PATON, J. and Semple, N.G. *Investigation of the Stability of an Earth Dam Subject to Rapid Drawdown including Details on Pore Pressures recorded during a Controlled Drawdown Test., in Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 85-90, Butterworth, London. 1961.*
- [Pin08] PINYOL, N. M.; Alonso, E. E and Olivella, S. *Rapid drawdown in slopes and embankments. Water Resources Research 44, 2008 W00D03, 22pp.*
- [Ste14] STELZER, O.; Montenegro H.; and Odenwald, B. *Consolidation Analyses Considering Gas Entrapment below the Phreatic Surface. Accepted for presentation at NUMGE 2014, Delft 2014.*
- [Ver13] VERRUIJT, A. *Theory and Problems of Poroelasticity. Delft University of Technology. Delft 2013. <http://geo.verruijt.net/>*